

Modelación de las emisiones del parque automotor en la ciudad de Cochabamba - Bolivia

Sonia Alvarado Arnez, Marcos Luján Pérez, Christian Bomblat

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana
Av. General Galindo s/n, Cochabamba, Bolivia

e-mail: lujan@ucbcba.edu.bo

Resumen

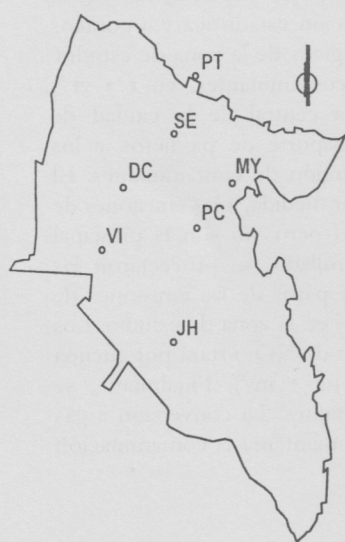
Se adaptó un modelo de cálculo para la estimación de las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales, material particulado y dióxido de azufre, producidos por el parque automotor en el centro urbano de Cochabamba-Bolivia. Se utilizó el programa EMOD/CMAP, que requiere de información sobre la composición y características del parque vehicular, intensidad del tráfico vehicular y una descripción de la red de tráfico de la zona de estudio. Esta información se recolectó en base al análisis de información estadística y a conteos directos de tráfico vehicular en diferentes puntos estratégicos de la zona de estudio. Mediante el modelo se calcularon las emisiones de contaminantes, en $\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$, generadas por los vehículos que circulan en la zona central de la ciudad de Cochabamba. Se determinó que los vehículos de transporte de pasajeros y los vehículos privados son los que emiten la mayor proporción de contaminantes. El aporte a las emisiones de material particulado y, en menor medida, a las emisiones de NO_2 de los buses de transporte público es significativo pero, no son la principal fuente de contaminación. Utilizando el modelo desarrollado, se proyectaron las emisiones del parque automotor hasta el año 2010 y, a partir de las emisiones de NO_x , se estimó la concentración promedio anual de NO_2 en la zona de estudio. Los datos indican que, a partir del año 2005, la concentración de NO_2 estará por encima de los valores guía recomendados por la OMS ($40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Finalmente, se analizaron opciones para reducir las emisiones contaminantes. La conversión a gas natural de un 60% o más de la flota vehicular, permitiría mantener la contaminación del aire a niveles aceptables hasta el año 2010.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, gestión de la calidad del aire, inventario de emisiones, modelación de emisiones, Cochabamba, Bolivia.

1 Introducción

Varios estudios han documentado el deterioro de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba y señalan que la causa principal de la contaminación del aire es el aumento de las emisiones del parque automotor [4][8]. En 2003, se registraron más de 140 000 vehículos en Cochabamba y la tasa anual del crecimiento del parque automotor era del 10% [2][9].

Desde el año 2000, la Honorable Municipalidad de Cochabamba, la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico (Swisscontact) y la Universidad Católica San Pablo-Regional Cochabamba están colaborando en el Programa de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MoniCA), monitoreando; con métodos pasivos, el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono troposférico (O_3) en siete sitios de la ciudad (Fig. 1). Además, existen tres estaciones de monitoreo con analizadores automáticos marca API (Advanced Pollution Instrumentation) para determinar las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), ozono O_3 y óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) en tres sitios de la ciudad (PC, SE y PT) (Fig. 1). Los analizadores automáticos registran la concentración de estos contaminantes cada 15 minutos, estos datos permiten hacer un seguimiento preciso de la variación de éstos contaminantes a lo largo del día. Finalmente, se cuenta con una red activa para el monitoreo de material particulado (PM_{10}) en tres lugares de la ciudad (Fig. 1, JH, MY y PC).



Código	Parámetros medidos
DC	O_3 , NO_2
JH	O_3 , NO_2 , PM_{10}
MY	O_3 , NO_2 , PM_{10}
PC	O_3 , NO_2^* , PM_{10} , CO^*
PT	O_3^* , NO_2
SE	O_3^* , NO_2^* , SO_2^*
VI	O_3 , NO_2

Figura 1. Ubicación de los puntos de monitoreo de la Red MoniCA en el municipio del cercado de Cochabamba-Bolivia. Contaminantes que se monitorean con equipos automáticos están señalados con un asterisco (*).

Las mediciones hechas por la red MoniCA indican que el sector más afectado por las emisiones contaminantes, especialmente por el NO_2 , es el centro de la ciudad de Cochabamba (Fig. 2) donde los valores guía de la OMS para NO_2 son excedidos. Además, datos de los últimos tres años de monitoreo indican que existe una tendencia marcada en el aumento de la contaminación del aire en el centro de la ciudad. Esta situación preocupa a las autoridades ambientales del municipio; sobre todo porque en la ciudad de Cochabamba, por su topografía y características climáticas, los contaminantes son disipados lentamente.

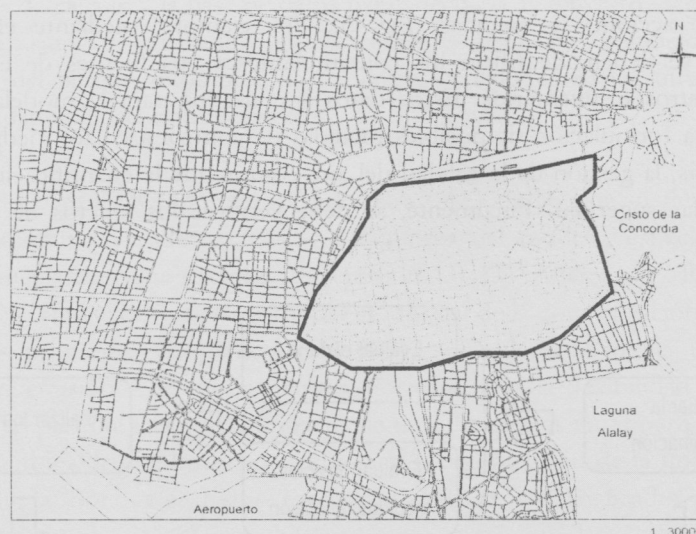


Figura 2: Delimitación del área de estudio en el centro de la ciudad de Cochabamba-Bolivia. El área de estudio comprende la zona con mayor tráfico vehicular de la ciudad de Cochabamba y, en consecuencia, de mayor contaminación atmosférica.

Para desarrollar estrategias que permitan gestionar la calidad del aire, es esencial contar con información confiable sobre el impacto del aporte del parque automotor al deterioro de la calidad del aire, en la actualidad y en el futuro. Sobre la base de un análisis del impacto del parque automotor, se podrán desarrollar acciones concretas para reducir los niveles de contaminación del aire y, sobre todo, evitar el deterioro de la calidad del aire en el futuro.

Por ello se adaptó el modelo EMOD/CMAP para estimar las emisiones del parque automotor en la zona central de la ciudad de Cochabamba y para realizar un inventario de las emisiones actuales. Sobre la base de esta información, se analizaron diferentes acciones para reducir la contaminación. El análisis de los escenarios permitió decidir qué acción sería más adecuada para reducir la contaminación del aire y sus efectos sobre la salud de la población y el medio ambiente.

2 Gestión de la calidad del aire

Para asegurar que los niveles de contaminación no conlleven riesgos para la salud y el bienestar de los habitantes, es importante que los organismos estatales y municipales tomen medidas precautorias y correctivas. Estas medidas deben asegurar que la calidad del aire esté conforme con los niveles definidos como aceptables por los organismos nacionales e internacionales.

La gestión de la calidad del aire persigue evitar y reducir los riesgos de la contaminación del aire a través de un proceso técnico-administrativo que comprende una serie de acciones y medidas (Fig. 3). Por ejemplo, mediante el monitoreo atmosférico, se deben identificar los contaminantes y sus fuentes de emisión para elaborar registros e inventarios. Estos datos son usados para la modelación de las emisiones y la formulación de posibles medidas de control a corto, mediano o largo plazo. Además, la gestión de la calidad del aire comprende la cuantificación del costo de las medidas sugeridas. Finalmente, se debe verificar los efectos de las medidas aplicadas.

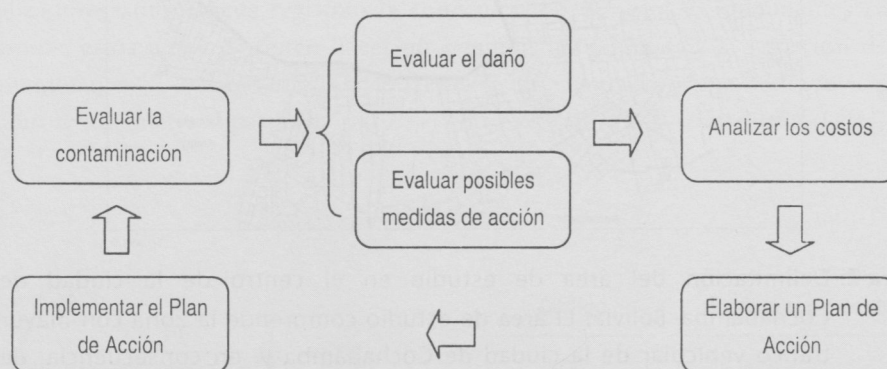


Figura 3: Proceso de gestión de la calidad del aire según Korc [6].

La gestión de la calidad del aire debe apoyarse en instrumentos, mecanismos y herramientas que permitan estimar los niveles de emisión en una determinada región, identificando y caracterizando las fuentes de emisión (puntuales, móviles, naturales y de área). Además, para llevar adelante una adecuada gestión de la calidad del aire, es esencial contar con inventarios de emisión que caracterizan, cuantitativa y cualitativamente las emisiones contaminantes de las fuentes emisoras, sus ubicaciones y las variaciones temporales. Es con este propósito, que se han venido desarrollando una serie de modelos de estimación de emisiones contaminantes y de concentración. Mediante estos modelos de emisión y concentración, es posible predecir cambios cuantitativos, ya sea por variación del aporte de las fuentes emisoras o por modificación de las condiciones meteorológicas. De esta manera, los inventarios y los modelos son importantes herramientas para la gestión de la calidad del aire. En el presente estudio se utilizó el modelo EMOD/CMAP para desarrollar el modelo de estimación de emisiones en la zona central de la ciudad de Cochabamba.

3 El modelo EMOD/CMAP

El modelo EMOD/CMAP fue desarrollado por las Agencias de Protección Ambiental Suiza y Alemana (1980-1995) [5]. En comparación con modelos similares, utilizados en los Estados Unidos (MOBILE5, EMFAC), Europa (CORINAIR/COPERT) y algunos países de América Latina, como México y Chile

(MOBILE5), el modelo EMOD/CMAP es relativamente versátil y permite modificar los parámetros de cálculo y la base de datos para adecuarla al contexto local. Los otros modelos han sido desarrollados específicamente para las condiciones y las características del parque automotor de los países y regiones en los que se aplican, limitando su adaptabilidad a otras regiones.

El modelo EMOD/CMAP fue elegido para este estudio por su flexibilidad, ya que permite modificar y adecuar varios parámetros del modelo, especialmente las categorías vehiculares y los factores de emisión [3] [5]. Además, EMOD/CMAP permite realizar estimaciones de la distribución espacial de la concentración de algunos contaminantes primarios, en particular el NO₂, sobre la base de la información generada sobre emisiones de contaminantes. Por otro lado, la flexibilidad del modelo EMOD/CMAP permite analizar el impacto de modificaciones en el parque vehicular tales como: cambios de combustible, cambios en la composición de la flota vehicular, renovación de la flota, etc. Estos escenarios pueden ser analizados de manera independiente.

La figura 4 ilustra esquemáticamente el principio de la modelación de emisiones mediante EMOD/CMAP [3][5]. Para el cálculo de las emisiones, el modelo EMOD/CMAP requiere, inicialmente, de información detallada sobre el tráfico vehicular en la zona de estudio como por ejemplo detalles de las diferentes calles, avenidas y auto-rutas de la zona (Fig. 4). La descripción de la red de tráfico se realiza mediante la identificación y ubicación de nodos (intersecciones entre calles y/o avenidas), tramos (calles y/o avenidas) y regiones (áreas definidas dentro del área general de estudio) [3][5].

Luego de haber descrito la red de tráfico, se establece el volumen promedio de tráfico que circula en la misma en un periodo de tiempo definido (ej. 1 h, 24 h) para un año de estudio base específico (Fig. 4). La descripción del volumen de tráfico debe incluir el detalle de la composición del tráfico vehicular, es decir la cantidad de vehículos por tipo o categoría de vehículo que se ha considerado en el modelo. La categoría o tipo de vehículo agrupa a vehículos con características similares, ya sea por tamaño, capacidad de transporte o uso del vehículo. Esta información debe ser recolectada con la mayor precisión posible ya que de ello depende la calidad de las estimaciones generadas por el modelo [5].

Una vez que se cuenta con la información detallada de la red de tráfico y la intensidad de tráfico vehicular en función de las diferentes categorías de vehículos previamente definidas, se seleccionan los factores de emisión más apropiados para cada una de las categorías y para los contaminantes estudiados [2] [5]. Los factores de emisión son constantes que relacionan la cantidad de contaminantes emitidos con el nivel de actividad del tráfico vehicular. El valor de los factores de emisión depende de varios factores, entre éstos: el tipo de combustible, el tamaño o potencia del vehículo, su capacidad de transporte, la antigüedad del vehículo, las características de la

conducción o patrón de manejo (frecuencia de arranques y paradas, aceleración, desaceleración, velocidad media, etc.). Los valores de los factores de emisión se miden experimentalmente y están incorporados en el software de soporte del modelo EMOD/CMAP. También es posible introducir factores de corrección para incorporar características específicas de la flota vehicular como el tipo de combustible, la antigüedad de la flota vehicular, etc. Una vez seleccionados y definidos los factores de emisión para cada una de las categorías vehiculares, se aplica la ecuación 1 para el cálculo de las emisiones de los contaminantes [3][5]:

$$E_x = \sum e_{x,i} A_i \quad (\text{Ec. 1})$$

donde, E_x es el valor de emisión para un contaminante determinado (x), e_x es el factor de emisión asociado al contaminante (x) y A_i es el nivel de actividad asociado a la fuente emisora, es decir la intensidad de tráfico vehicular de la categoría i . El valor de la emisión de contaminantes se expresa generalmente en $\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$.

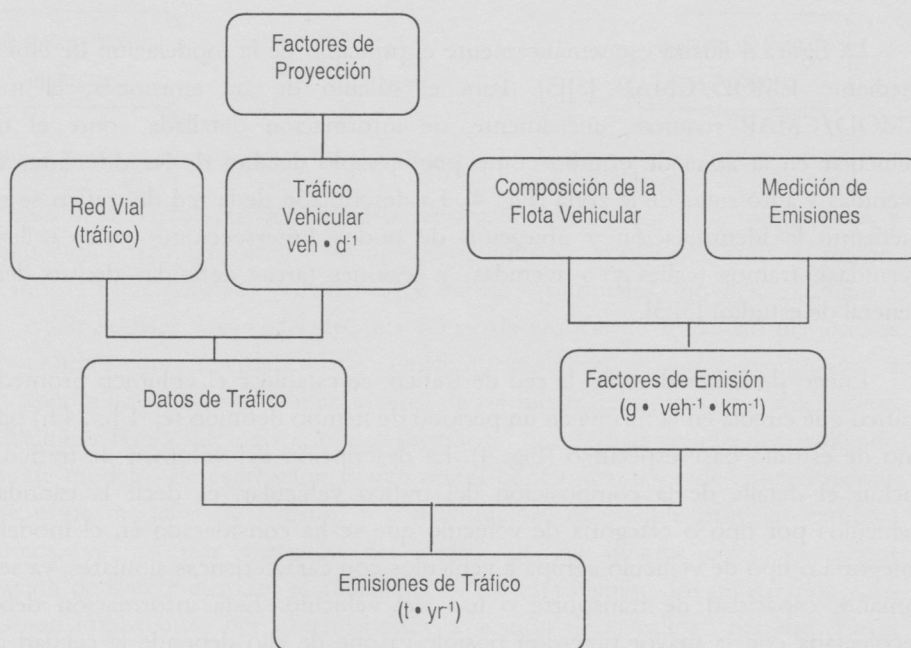


Figura 4: Principio de la modelación de emisiones de tráfico mediante el modelo EMOD/CMAP.

El modelo EMOD/CMAP permite estimar las concentraciones promedio anuales de NO_2 en cada tramo definido dentro del área de estudio, sobre la base de las emisiones de NO_x calculadas por el modelo. EMOD/CMAP considera tres aportes a la concentración de NO_2 en el aire: la concentración de fondo (C_{fondo}), que se debe a fuentes de área en la zona de estudio; la concentración importada, que se debe a contaminante transportado de otras zonas (C_{import}) y la concentración por las emisiones

del tráfico vehicular (C_{calle}) (Fig. 5). Finalmente, la concentración estimada de NO_2 (C_{total}), en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, es igual a la suma de estos tres aportes (Ec. 2). El proceso del cálculo está esquematizado en la figura 5 [3][5].

$$C_{total} = C_{calle} + C_{fondo} + C_{import} \quad (\text{Ec. 2})$$

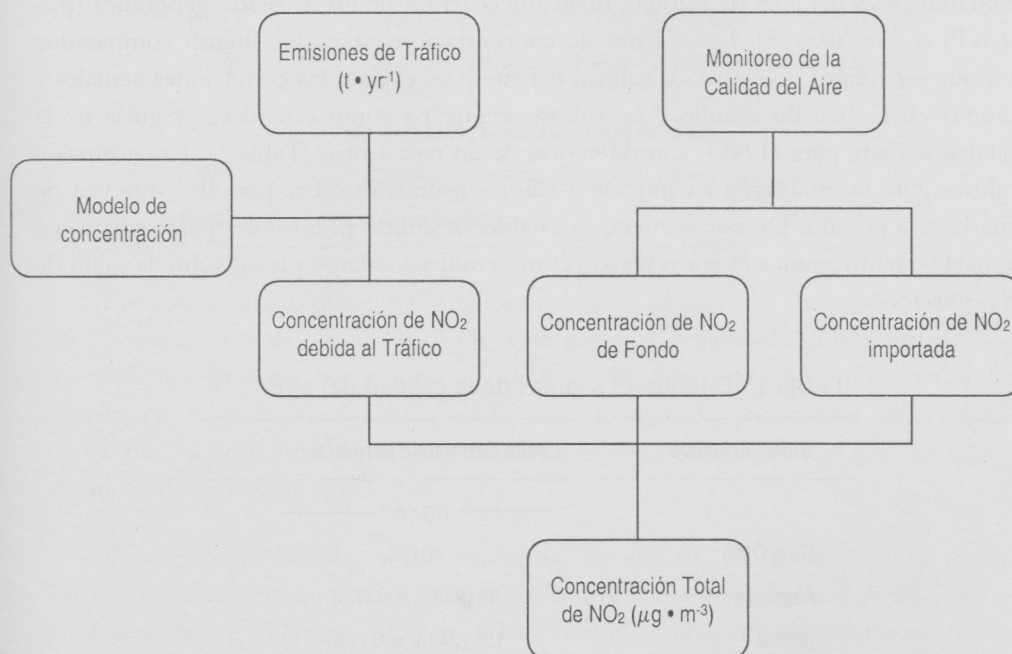


Figura 5: Principio de la modelación de concentraciones de NO_2 mediante el modelo EMOD/CMAP.

Las concentraciones C_{fondo} y C_{import} deben ser medidas experimentalmente. Para este estudio, C_{fondo} fue establecido en base a datos generados por la Red MoniCA mientras, para el C_{import} , se asignó el valor de cero, debido a que no existen fuentes importantes fuera de la zona de estudio. La concentración C_{calles} se calculó mediante la ecuación 3:

$$C_{calle} = a \times E_{spec} + b \times \left[1 - e^{\left\{ \frac{-E_{spec} \times (A - a)}{b} \right\}} \right] \quad (\text{Ec. 3})$$

donde, E_{spec} corresponde a los valores de emisión de NO_x ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$) generadas por el tráfico de vehículos en un tramo y a , b y A corresponden a parámetros del modelo. Los parámetros a , b y A dependen de la cinética de la reacción de transformación del NO en NO_2 y de la dispersión de los contaminantes. La cinética de esta reacción depende a su vez de las condiciones en la zona de estudio (radiación solar, temperatura, humedad y presión); de la dispersión y de las características topográficas y climáticas en la zona de estudio [5]. Los valores por defecto incluidos en el modelo

EMOD/CMAP son: $a = 0.058 \text{ d} \cdot \text{km}^{-2}$, $b = 22 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ y $A = 1.3 \text{ d} \cdot \text{km}^{-2}$. Sin embargo, los parámetros a , b y A tienen que ser ajustadas en base a las condiciones en la región.

Una vez determinadas las concentraciones promedio anuales de NO_2 para cada tramo, se utilizó esta información para elaborar mapas de concentración de contaminantes del área de estudio, mediante sistemas de información geográfica (p.e. ILWIS o ArcView) [5]. Los valores de concentración estimados fueron comparados con los estándares y/o guías de calidad del aire para evaluar las condiciones actuales y futuras en el área de estudio. Los valores asignados como estándares y guías de la calidad del aire para el NO_2 son diferentes de un país a otro (Tabla 1). Las normas y valores guía se establecen en función a valores promedio sobre periodos que van de una hora a un año. De esta manera, se establecen límites permisibles para reducir los impactos, tanto agudos (a corto plazo), como crónicos (a largo plazo) sobre la salud de la población.

Tabla 1: Estándares y guías de la calidad del aire.

Guía/Normativa	Límite permisible para NO_2
	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Guía OMS	40 (yr)
Alemania	80 (24 h), 200 (1 h)
Bolivia	150 (24 h), 400 (1 h)
Chile	100 (anual), 470 (1 h)
Estados Unidos	100 (anual), 300 (24 h)
Guatemala	40 (yr)
México	395 (1 h)

Entre paréntesis el tiempo de promediación

(En base a [1] y [11])

4 Resultados y discusión

El área de estudio tiene una extensión de 4 km^2 aproximadamente (Fig. 2). Se describió la red de tráfico mediante 338 nodos (intersecciones entre calles y/o avenidas) y 624 tramos (calles y/o avenidas). Para la caracterización del parque vehicular, se utilizó la información del Registro Único Automotor [9] del municipio, que registra a los vehículos que pagan impuestos ($>144\,000$ vehículos). Se establecieron siete categorías vehiculares para caracterizar la composición del parque automotor (Tabla 2). Las características del parque automotor, por categoría vehicular y tipo de combustible que utilizan, se detallan en la tabla 3.

Tabla 2: Categorías vehiculares definidas para la clasificación de la flota vehicular de Cochabamba-Bolivia.

Categoría vehicular	Aclaración
PC 1	Vehículo público de transporte de pasajeros (taxis)
PC 2	Vehículo privado de transporte de pasajeros
Ubus 1	Bus de transporte público con capacidad < 20 pasajeros (trufis)
Ubus 2	Bus de transporte público con capacidad mayor >20 pasajeros (micros)
LDV	Vehículos livianos (Light duty vehicles)
HDV	Vehículos pesados (Camiones) (Heavy duty vehicles)
Moto	Motocicletas

Los datos indican que el 69% de los vehículos usa gasolina, 24% usa diesel y sólo un 7% usa gas natural (Tabla 3). A pesar de que en Cochabamba solamente el 7% de los vehículos usan gas natural, el 66% de los vehículos convertidos a gas natural en Bolivia circulan en Cochabamba [10]. Actualmente, la proporción de vehículos convertidos a gas natural sigue en aumento debido a que, en Bolivia, el gas natural es el combustible de menor costo.

Para generar los datos de intensidad de tráfico vehicular para el modelo EMOD/CMAP, en febrero del 2003, se realizaron conteos vehiculares de 24 h, en seis puntos diferentes del centro urbano de Cochabamba, mediante observaciones directas y mediante video cámaras (Fig. 6). Además, se realizaron conteos de 1 h en 12 puntos diferentes de la zona de estudio durante la hora pico del medio día (12:00-13:00), en calles de alto tráfico, mediano tráfico y poco tráfico. A partir de los conteos de 1 h, se estimó el tráfico vehicular diario, considerando que el número de vehículos que circulan entre las 12:00-13:00 del día representan el 7.2% del tráfico en 24 h, en las vías de alto, mediano y bajo tráfico vehicular (Fig. 6). Como vías de alto tráfico se consideran las con un promedio diario de entre 20-40 veh • min⁻¹; como vías de mediano tráfico las con 7-20 veh • min⁻¹ y las de bajo tráfico con 0-7 veh • min⁻¹. Partiendo de ésta información, se estimó el tráfico vehicular en cada uno de los tramos, clasificándolos previamente en tramos de alto, mediano y bajo tráfico vehicular. En algunos casos, se realizaron conteos de 20 min para clasificar tramos cuya clasificación era dudosa. Se procedió de esta manera, porque fue impráctico realizar conteos detallados sobre el total de los 624 tramos.

Tabla 3: Caracterización del parque automotor en la ciudad de Cochabamba-Bolivia en 2003.

Categoría vehicular	Cantidad de vehículos	Proporción	Tipo de combustible		
			Gasolina	Diesel	Gas natural
	#		%		
PC 1	28 100	20	76.3	5.5	18.2
PC 2	52 400	36	94.3	3.9	1.8
Ubus 1	6 900	5	88.2	8.3	3.5
Ubus 2	4 300	3	0.0	87.1	12.9
LDV	27 800	19	0.0	59.4	40.6
HDV	20 000	14	0.0	100.0	0.0
Moto	4 500	3	100	0.0	0.0
Totales	144 000	100	69.0	24.2	6.8

(En base a [9] y [10])

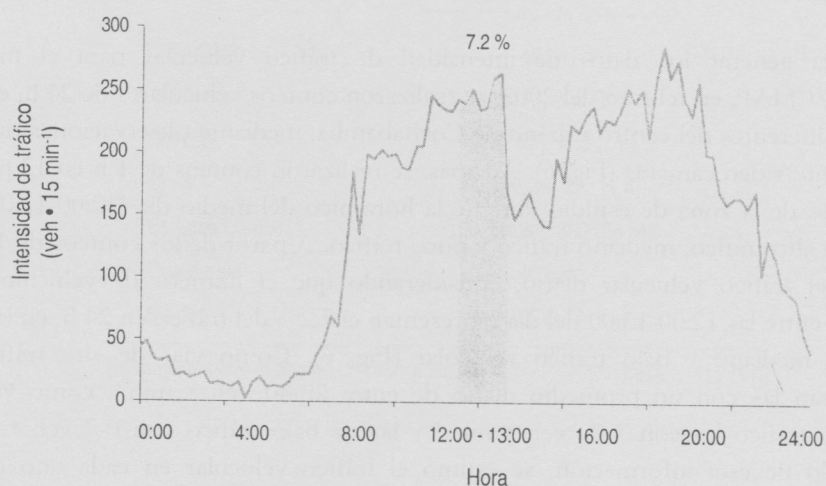


Figura 6: Distribución de la intensidad de tráfico vehicular promedio diaria para Cochabamba-Bolivia en febrero del 2003.

Partiendo de los conteos de 24 h, se elaboró la distribución de la intensidad de tráfico vehicular en relación a las categorías vehiculares definidas para el modelo (Fig. 7 y tabla 3). La circulación de vehículos de transporte público representó un 61% del total diario, donde taxis, radiotaxis y taxitrufis (PC 1) corresponde al 51% y 10% a los micros y trufis (Ubus). Es importante hacer notar que, en el sector del transporte público, la categoría de vehículos PC1 (taxis y radiotaxis) representan la mayor

proporción de tráfico vehicular; en cuanto a los vehículos privados, la categoría PC2 representa la mayor proporción de tráfico vehicular. Esta distribución difiere bastante de la distribución de la composición del parque vehicular por categoría vehicular (fig. 7).

Para caracterizar el tráfico de los buses de transporte público (Ubus 1 y Ubus 2) de manera precisa, se analizaron las rutas establecidas para estos vehículos y su relación con la frecuencia de tráfico. En Cochabamba, las rutas del transporte público son fijas y, en general, deben respetarse y mantenerse en el tiempo. Por lo tanto, debe existir una relación entre el número de rutas que pasan por un determinado tramo y la cantidad de vehículos de las categorías Ubus 1 y Ubus 2 que circulan por estos tramos. Para establecer esta correlación, se determinó la **cantidad** de micros y/o trufis en circulación en tramos en los que se realizó un conteo de 24 h y el **número de rutas** de micros y trufis que pasan por estos tramos. Luego, se determinó la recta de correlación entre estas dos variables. Se observó una alta correlación entre las variables. A partir de la recta de correlación, se estableció el volumen de tráfico de micros y trufis en otros tramos.

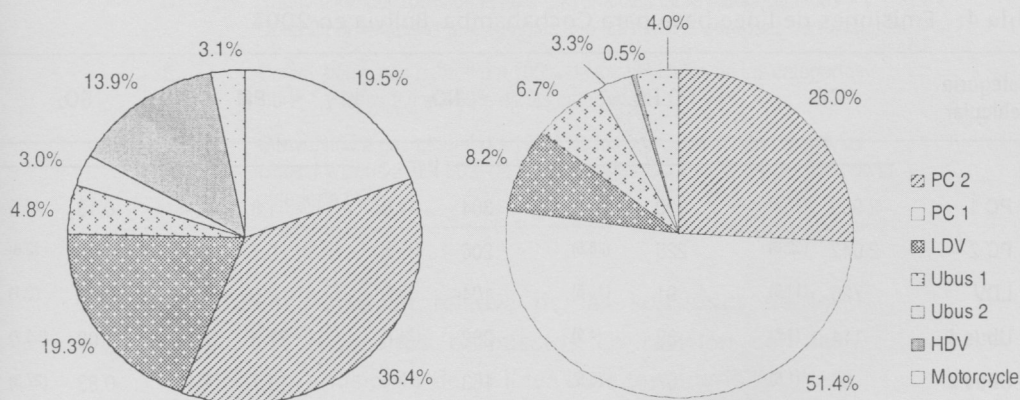


Figura 7: (a) Composición de vehículos, por categoría vehicular, del parque automotor de la ciudad de Cochabamba. (b) Composición del tráfico vehicular en la zona de estudio, según conteo realizado en el mes de febrero de 2003.

La situación de tráfico para cada categoría vehicular se estableció sobre la base de medidas de velocidades promedio y las características de los diferentes tramos. Así, se seleccionaron las situaciones de tráfico más adecuadas para utilizarlas en el modelo EMOD/CMAP. Relacionando la información sobre la situación de tráfico con las características de la flota vehicular, se seleccionaron los factores de emisión más adecuados para la zona de estudio. También se siguieron las sugerencias de los autores del modelo EMOD/CMAP para ajustar los factores de emisión, considerando experiencias previas de aplicación del modelo en Lima-Perú [3][5].

Con los parámetros del modelo definidos, se aplicó la ecuación 1 para estimar las emisiones de los contaminantes primarios estudiados (Tabla 4). Las emisiones de CO y HC se deben principalmente a las emisiones de los vehículos livianos de transporte (80% del CO y 71% de los HC), tanto del servicio público, como del privado (PC 1 y PC 2) (Tabla 4). Mientras la principal fuente de las emisiones globales de NO_x son los vehículos livianos de transporte público (PC 1 con 28.7%), seguidos de los buses con capacidad de <20 pasajeros (Ubus 1 con 24.7%); los vehículos privados de transporte de pasajeros también aportan significativamente a las emisiones de NO_x (Tabla 4). En el caso de las emisiones de SO₂, se puede atribuir 83% de las emisiones globales a las categorías Ubus 1 y Ubus 2, esto debido a que la mayoría de vehículos a diesel que circulan por las calles, corresponden a éstas categorías de vehículo y, este combustible tiene un elevado contenido de azufre en comparación a la gasolina y el gas natural que se utiliza en Cochabamba. Las emisiones de material particulado se deben, en mayor proporción, también a las categorías de vehículos que tienen la mayor parte de vehículos diesel, es decir los vehículos Ubus 1 y Ubus 2; esto porque los motores diesel, al ser un combustible pesado, generan una mayor proporción de material particulado en relación a motores que funcionan con combustibles más ligeros.

Tabla 4: Emisiones de línea base para Cochabamba-Bolivia en 2003.

Categoria vehicular	CO		HC		NO _x		PM		SO ₂	
	t·yr ⁻¹ (%)									
PC 1	2 965	(47.4)	330	(41.8)	304	(28.7)	1.8	(4.0)	0.13	(6.7)
PC 2	2 042	(32.6)	225	(28.5)	206	(19.5)	0.7	(1.6)	0.05	(2.6)
LDV	726	(11.6)	91	(11.5)	104	(9.8)	2.5	(5.6)	0.06	(3.1)
Ubus 1	114	(1.8)	39	(4.9)	262	(24.7)	21.5	(47.9)	1.08	(55.7)
Ubus 2	96	(1.5)	67	(8.5)	163	(15.4)	15.7	(35.0)	0.53	(27.3)
Moto	308	(4.9)	32	(4.1)	2	(0.2)	0.0	(0.0)	0.00	(0.0)
HDV	7	(0.1)	5	(0.6)	18	(1.7)	2.7	(6.0)	0.09	(4.6)
Totales	6 258	(100)	789	(100)	1 059	(100)	44.9	(100)	1.94	(100)

Para evaluar el impacto de posibles medidas para reducir la contaminación del aire, se analizaron diferentes escenarios, aplicando medidas de acción como: renovación de la flota vehicular por vehículos más eficientes y sustitución de los combustibles pesados (gasolina y diesel) por gas natural. La tabla 5 describe los escenarios utilizados para evaluar el impacto de las medidas de acción y para proyectar las emisiones de contaminantes hasta el año 2015. Las proyecciones se realizaron considerando un crecimiento promedio del parque automotor de un 7% · yr⁻¹ entre 2003-2015.

Introduciendo los diferentes escenarios de reducción de emisiones al modelo desarrollado para la zona central de la ciudad de Cochabamba, se calcularon los

cambios de las emisiones de contaminantes. La tabla 6 muestra las variaciones relativas en relación a las emisiones en las condiciones actuales del parque automotor (escenario A). La manera más eficaz de reducir las emisiones es la conversión a gas natural de la mayor parte del parque automotor (escenario F). La reducción de las emisiones, producto de la renovación de la flota (escenario D) también es importante pero no tan significativa como la conversión a gas natural de los vehículos de la categoría PC 1 y de los buses de transporte público (Ubus 1 y Ubus 2).

Tabla 5: Escenarios propuestos para el análisis de las emisiones proyectadas.

Escenario	Cambio propuesto
A	Ninguno
B	Conversión a gas natural del 100% de los vehículos de las categorías Ubus 1 y Ubus 2
C	Conversión a gas natural del 100% de los vehículos de las categorías Ubus 1 y Ubus 2 y del 80% de la categoría PC 1
D	Renovación del 100% de la flota de vehículos de la categoría Ubus 1 y Ubus 2 por vehículos que cumplen con las normas europeas de emisiones
E	Conversión a gas natural del 100% de los vehículos de las categorías Ubus 1 y Ubus 2 y del 60% de las categorías PC 1 y PC 2
F	Conversión a gas natural del 100% de los vehículos de las categorías Ubus 1 y Ubus 2, del 60% de las categorías PC 1 y PC 2 y del 60% de la categoría LDV

Tabla 6: Variación relativa de las emisiones de los escenarios propuestos en relación con las emisiones de la línea base (escenario A).

Escenario	CO	HC	NO _x	PM	SO ₂
	%				
A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	-2.3	-35.7	+11.0	-81.9	-82.9
C	-39.7	-57.2	-20.5	-81.9	-82.9
D	0.0	-4.9	0.0	-35.4	0.0
E	-47.3	-61.5	-26.9	-81.9	-82.9
F	-51.6	-66.1	-20.2	-81.9	-82.9

Finalmente, los valores de emisiones de NO_x, calculados mediante el modelo desarrollado sobre la base del EMOD/CMAP, fueron utilizados para estimar la distribución espacial de la concentración de NO₂ en la zona de estudio (Ec. 2 y 3). Los parámetros de la ecuación 3 fueron calibrados, sobre la base de las

concentraciones de NO_2 medidos con analizadores automáticos en uno de los puntos en que se realizó el conteo de vehículos. La única constante modificada fue la constante a , aplicando el valor de $0.355 \text{ d} \cdot \text{km}^{-2}$. Este valor es mayor que el valor por defecto del programa, esto debido a que la cinética de la transformación de NO en NO_2 es más rápida en Cochabamba por los elevados niveles de radiación solar y ultravioleta que se tienen a este nivel del mar. Las concentraciones C_{fondo} y C_{import} se obtuvieron tomando en cuenta los valores medidos por la Red MoniCA. Se utilizó un valor de $4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ para C_{fondo} y $0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ para C_{import} . La concentración C_{calles} se calculó con la ecuación 3.

Los datos indican que, si las características de la flota vehicular del año base (2003) se mantiene constante y el parque automotor crece según las proyecciones, la concentración de NO_2 superará el valor guía anual de $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ de la OMS a partir del año 2005 (Tabla 7). Por otro lado, los escenarios que proponen medidas para reducir las emisiones contaminantes resultan en una reducción en los valores promedio anuales de concentración de NO_2 desde el año 2003 en adelante (Tabla 7). Sin embargo, sólo los escenarios C, E y F permiten mantener los niveles de contaminación por NO_2 por debajo del valor guía propuesto por la OMS. Es interesante que la renovación de la flota vehicular del transporte público (escenario D) no es una alternativa eficaz para la reducción de la emisiones porque no logra reducir las emisiones lo suficiente como para no sobrepasar los valores guía de la OMS.

Tabla 7: Concentraciones promedio anuales de NO_2 para diferentes escenarios.

Escenario	2003	2005	2010
	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$		
A	40.5	43.9	52.0
B	33.2	35.9	42.2
C	27.6	29.7	34.7
D	39.6	42.9	50.7
E	26.3	28.3	33.0
F	24.9	26.7	31.1

Por la versatilidad del modelo EMOD/CMAP, también fue posible calcular la distribución espacial de la concentración de NO_2 en el área de estudio (Fig. 8 y 9). La figura 8a indica que, en 2003, para el escenario de línea base (A), las concentraciones de NO_2 en los principales ejes viales superan el valor guía anual propuesto por la OMS (2000), alcanzando concentraciones de NO_2 superiores a los $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Esta situación se deteriora hasta el año 2010 debido al crecimiento del parque automotor y las regiones en las que se supera el límite de $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ son mucho más amplias (Fig. 8b).

Además, en algunos puntos más afectados por la emisiones de los vehículos, la concentración de NO_2 llega a superar incluso valores de $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

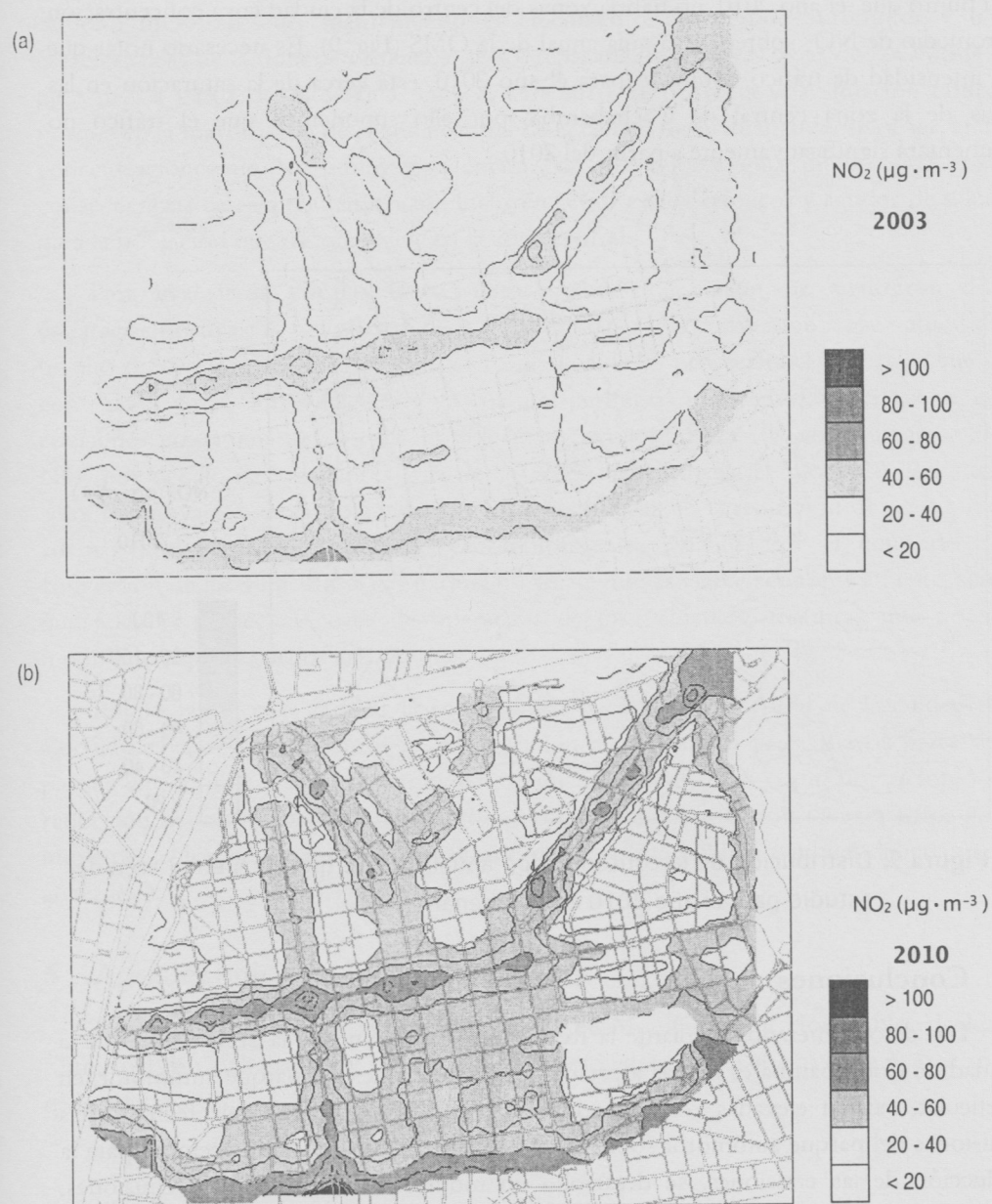


Figura 8: Distribución de las concentraciones promedio anuales de NO_2 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) según el escenario A para Cochabamba-Bolivia: (a) año base 2003 y (b) año 2010.

El resultado de las proyecciones de la distribución de concentraciones de NO_2 para el escenario F en el año 2010 muestran que la conversión de un 60% o más del parque automotor a gas natural reduciría eficazmente las emisiones contaminantes, a tal punto que, el año 2010, no habría zonas del centro de la ciudad cuya concentración promedio de NO_2 sobrepase la guía anual de la OMS (Fig. 9). Es necesario notar que la intensidad de tráfico, estimado para el año 2010, está cerca de la saturación en las vías de la zona central de Cochabamba, por ello suponemos que el tráfico no aumentará significativamente a partir del 2010.



Figura 9: Distribución de la concentración anual de $\text{NO}_2 (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ en el área de estudio para el año 2010 en el escenario F.

5 Conclusiones

Los datos generados mediante la Red MoniCA indican que la zona central de la ciudad de Cochabamba es la más afectada por las emisiones del parque automotor, en particular, existen elevadas concentraciones de NO_2 . Para analizar el efecto de las emisiones del parque automotor sobre la calidad del aire y las posibles acciones para la reducción de las emisiones, se desarrolló un modelo de estimación de emisiones, basado en el programa EMOD/CMAP. Se eligió el modelo EMOD/CMAP porque es fácil de adaptar a las condiciones y características del parque automotor de Cochabamba, permitiendo la incorporación de las características específicas de la zona de estudio.

Los resultados de la modelación de emisiones para el año 2003 muestran que son los vehículos de transporte público de pasajeros (taxis y similares) y los vehículos privados que más contaminan el aire con CO, HC y NO_x . Por otro lado, los buses de

transporte público causan la mayor parte de las emisiones de partículas suspendidas, debido a que son la categoría de vehículos que más utilizan diesel como combustible.

Las simulaciones de la concentración de NO_2 (promedio anual) para la zona de estudio, muestran que, manteniendo el crecimiento del parque automotor y las características de la flota de vehículos, se sobrepasarán los valores guía de la OMS ($40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) a partir del año 2005. Para el año 2010, se proyecta una situación crítica porque en la mayor parte de la zona central de la ciudad de Cochabamba se observarán concentraciones de NO_2 muy por encima de los valores guía de la OMS. Las consecuencias de esta contaminación incluyen serios daños crónicos y agudos de salud para la población que trabaja y vive en la zona central.

Para evaluar la eficacia de posibles medidas de acción, se analizaron dos estrategias posibles: la renovación de la flota vehicular y la conversión a gas natural de un alto porcentaje de los vehículos. Los resultados de las proyecciones muestran que la conversión de la flota vehicular a gas natural permitiría una reducción eficaz de las emisiones contaminantes y sería posible mantener los niveles de contaminación de NO_2 por debajo de los valores guía de la OMS, incluso hasta el año 2010. Por otro lado, la renovación de la flota vehicular no es tan eficaz en la reducción de emisiones, además que probablemente sería económicamente inviable. Por el contrario, la conversión de los vehículos a gas natural no solamente es viable económicamente, sino que además reduce el costo de operación de los vehículos, mientras que no se modifique el precio de los carburantes.

Por lo tanto, para reducir la contaminación en la zona central de la ciudad de Cochabamba, se debe promover la conversión a gas natural de la mayor parte del parque automotor. Otros escenarios para reducir las emisiones, como por ejemplo la reducción del tráfico vehicular en la zona central, la sincronización de semáforos y la implementación de un sistema centralizado del transporte público también deberían ser analizados.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la Red MoniCA de la Honorable Alcaldía Municipal de Cochabamba y al personal de Swisscontact por el apoyo en la generación de los datos.

Bibliografía

- [1] Bolivia: Reglamento D.S. No. 24176. 1995. *Reglamentos a la Ley de Medio Ambiente*. La Paz-Bolivia.
- [2] INE (Instituto Nacional de Estadística). 2003. *Parque automotor por año según tipo de servicio y vehículo: Bolivia*. La Paz-Bolivia.

- [3] INFRAS (Consulting Group for Policy Analysis and Implementation). 2003. *User Manual of EMOD/CM-AP Version S-2E: Concept, Model description, Installation Procedures*. Zürich-Suiza.
- [4] Instituto de Geografía, Karl-Franzens Universität Graz, Instituto de Ecología, UMSA-La Paz y Honorable Municipalidad de Cochabamba. 2000. *Contaminación Atmosférica y climatología en la ciudad de Cochabamba*. Oficialía Mayor de Desarrollo Humano y Medio Ambiente. Cochabamba-Bolivia.
- [5] Keller, M., J. Heldstab y R. Zbinden. 2000. *Air Quality Modelling: Training Course*. INFRAS. Zürich-Suiza.
- [6] Korc, M. 2001. *Sistemas de gestión de la calidad del aire. Primer Simposio Nacional de Medio Ambiente*. Cochabamba-Bolivia.
- [7] OMS (Organización Mundial de la Salud). 2000. *Guías de la calidad del aire*. WHO/SDE/OEH/00.02. Ginebra-Suiza.
- [8] Rodríguez, R. 1996. *Monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba*. Prefectura de Cochabamba. Cochabamba-Bolivia.
- [9] RUA (Registro Único Automotor). 2004. *Distribución vehicular en Cochabamba: por tipo de servicio y categorías vehiculares (2003-2004)*. Cochabamba-Bolivia.
- [10] Superintendencia de Hidrocarburos. 2004. *Informe estadístico*. Dirección de Comercialización de Derivados y Distribución de Gas Natural. La Paz-Bolivia.
- [11] Swisscontact. 2000. *Manual de gestión de la calidad del aire*. Programa Aire Puro: Programa Regional para Centro América y el Caribe.